

VŠB – Technická universita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

Hodnocení vybraných vlastností HVOF nástřiku kobaltové slitiny

Assesment of Selected Properties HVOF Cobalt Alloy Coatings

Student:

Karel Hunčík

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Karel Hunčík**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Hodnocení vybraných vlastností HVOF nástřiku kobaltové slitiny  
Assesment of Selected Properties HVOF Cobalt Alloy Coatings

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii technologie vysokorychlostního nástřiku plamenem-HVOF.
2. Proved'te rozbor používaných přídavných materiálů a jejich vlastnosti na bázi kobaltu.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program ověření užitečných vlastností HVOF nástřiků.
4. Dosažené výsledky porovnejte s literárními prameny a proved'te diskusi.

Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.

ASM. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM 2004.

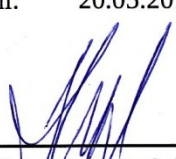
<http://www.stellite.com/>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 20. 5. 2013 .....

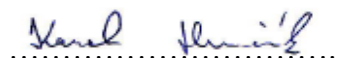
.....  
.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užívat dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2013



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Karel Hunčík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nová 392, Postřelmov 789 69

## **Anotace bakalářské práce**

HUNČÍK, K. *Hodnocení vybraných vlastností HVOF nástřiku kobaltové slitiny: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2013, Vedoucí práce: Ing. Ochodek, V.

Bakalářská práce se zabývá metodou vysokorychlostního nástřiku HVOF. Cílem této práce je ověření vybraných vlastností povlaků na bázi kobaltu a karbidu wolframu. Teoretická část práce je zaměřena na studii metody HVOF a seznámení se s jejími vlastnostmi. Dále je provedena charakteristika povlaků slitin typu Tribaloy T-400, T-800 a povlaků WC. Experimentální část zahrnuje praktickou realizaci zkušebních vzorků a ověření užitečných vlastností povlaků Praxair Co-109-7 a Amperit 529. U těchto povlaků se ověřuje tvrdost, tloušťka a mikrostruktura nástřiku. Nakonec je provedeno vyhodnocení výsledků a porovnání s literárními prameny.

## **The annotation of Bachelor's dissertation**

Hunčík, K. *Assesment of Selected Properties HVOF Cobalt Alloy Coatings: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2013, Thesis head: Ing. Ochodek, V.

The bachelors thesis is describing the method of highspeed spraying HVOF. The aim of this work is to verify the selected attributes of original film created by the powder on cobalt and tungsten carbide basis. The theoretical part of my work is solving the principle of the method HVOF and introduction with its property. There are some devices determined for work and analysis of the powder Tribaloy T-400, T-800 and WC mentioned in my thesis. The experimental part contains practical realisation of trial samples and the verification of usable attributes of the film, type Praxair Co-109-7 and Amperit 529. There is an inspection of hardness, thickness and microstructure of these samples. Finally there is the assessment of result and the comparison with literature sources.

# Obsah

<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Studie technologie vysokorychlostního nástřiku plamenem – HVOF .....</b>	<b>11</b>
1.1 Zařazení HVOF nástřiku .....	11
1.2 Popis technologie HVOF nástřiku .....	12
1.3 Vlastnosti HVOF nástřiků .....	13
1.4 Využití HVOF nástřiků .....	14
<b>2 Zařízení používané pro HVOF .....</b>	<b>16</b>
2.1 Ovládací konzole využívané pro HVOF .....	16
2.1.1 Zařízení JP-5000 .....	17
2.1.2 Zařízení JP-8000 .....	17
2.1.3 Zařízení Jet Kote II Nova.....	18
2.1.4 Zařízení Jet Kote III .....	19
2.2 Hořáky používané k nástřiku metodou HVOF .....	19
<b>3 Rozbor používaných přídavných materiálů a jejich vlastností .....</b>	<b>21</b>
3.1 Používané přídavné materiály .....	21
3.2 Prášky na bázi WC .....	22
3.3 Prášky na bázi kobaltu .....	23
3.3.1 Tribaloy T-400 .....	23
3.3.2 Tribaloy T-800 .....	24
<b>4 Charakteristika materiálů a zařízení určených k experimentu .....</b>	<b>25</b>
4.1 Vlastnosti základního materiálu .....	25
4.2 Vlastnosti materiálů použitých pro nástřik metodou HVOF.....	26
4.2.1 Amperit 529 .....	27
4.2.2 Praxair Co-109-7.....	27
4.3 Zařízení využitě k nástřiku.....	28

<b>5</b>	<b>Ověření užitečných vlastností HVOF nástřiků.....</b>	<b>29</b>
5.1	Návrh experimentu.....	29
5.2	Příprava experimentu .....	30
5.2.1	Dělení materiálu.....	30
5.2.2	Zapékání vzorků .....	31
5.2.3	Broušení a leštění vzorků.....	31
5.2.4	Leptání .....	32
5.3	Provedení experimentu.....	33
5.3.1	Měření tloušťky nanesené vrstvy nástřiku .....	33
5.3.2	Zkoumání mikrostruktury .....	35
5.3.3	Měření mikrotvrdosti .....	38
<b>6</b>	<b>Vyhodnocení dosažených výsledků .....</b>	<b>40</b>
	<b>Závěr .....</b>	<b>42</b>
	<b>Použité prameny .....</b>	<b>45</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název	Jednotka
HVOF	high velocity oxygen fuel	[-]
D-GUN	detonační nástřik	[-]
s	tloušťka nástřiku	[ $\mu\text{m}$ , mm]
v	rychlost nanášení	[ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$\dot{m}$	hmotnostní tok	[ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
t	teplota	[°C]
A	adheze	[kPa, Pa]
p	pórovitost	[%]
w	hmotnostní procento	[hm%]
$\eta$	účinnost	[%]
l	vzdálenost	[mm]
p	tlak	[MPa, Pa]
T-400	Tribaloy prášek na bázi kobaltu	[-]
T-800	Tribaloy prášek na bázi kobaltu	[-]
WC	wolfram karbid	[-]



## Úvod

V novodobém pojetí průmyslu se klade důraz především na přesný popis použitých materiálů a spolehlivost jejich vlastností. Z tohoto důvodu je cílem bakalářské práce seznámení se s technologií HVOF nástřiku a vyhodnocení vlastností aplikovaných prášků Amperit 529 na bázi karbidu wolframu a Praixar Co-109-7 na bázi kobaltu. Oblast vlastností, na které je práce zaměřena, jsou mikrostruktura nástřiků, jejich tvrdost a tloušťka.

Prášek Praxair Co-109-7 výborně odolává opotřebení až do teplot 800 °C. K dalším přednostem patří nízký koeficient tření a dobrá korozní odolnost. Lze jej uplatnit na lopatkách turbín. Druhý z prášků Amperit 529 lze využít do teplot 500 °C. Vykazuje vysokou odolnost proti korozi. Pomocí metody HVOF se vytváří velice hustý nástřik, jehož důsledkem je značná tvrdost. Využití tohoto prášku spatřujeme v petrochemickém průmyslu.

Proces známý jako HVOF se objevil v roce 1958, kdy ho vynalezla firma Union Carbide (dnes Praxair). V té době ovšem nebyl nějak významný, zejména kvůli používanému zařízení. Postupem času se celá technologie zdokonalovala. Své pevné místo na trhu zaujala později v roce 1980. K tomu přispěl James Browning, když uvedl na trh systém Jet Kote, který vedl k zefektivnění metody vysokorychlostního nástřiku. Ta se dnes stala již nedílnou součástí průmyslu. HVOF technologie spadá do kategorie žárových nástřiků a je uváděna jako jedna z nejnovějších.<sup>1</sup>

Žárové nástřiky jsou pro průmysl užitečné svými vlastnostmi, kterých lze docílit na povrchu součástí. Díky rozsáhlému spektru složení prášků lze docílit mnoha různých podob povrchů. Aplikace těchto povlaků je rozšířená na velké množství materiálů. Použití nástřiků se řídí podle teploty tavení původních materiálů. Vhodná je na většinu kovových i nekovových materiálů, naopak pro keramiku není žádoucí. Žárové nástřiky nejsou použitelné v místech s malými vnitřními otvory, kvůli jejich špatné dostupnosti. Touto aplikací se ve velkém množství nahrazují ušlechtilé materiály, což snižuje finanční náklady na výrobu. Proto má technologie pozitivní vliv na ekonomii podniků. Podstatné to je zejména z pohledu konkurence schopnosti na trhu.

V současné době se technologie HVOF stala standardem ve stříkání karbidů a jejich slitin pro řadu aplikací v leteckém průmyslu, které dříve byly prováděny pomocí elektrolytického chromování. K přednostem vytvořeného povlaku patří jeho vysoká hustota a adheze k podkladu. Nástřík se vyznačuje vysokou tvrdostí a nízkým obsahem oxidů. Pomocí HVOF metody se dosahuje velmi jemné struktury. K nejpoužívanějším práškům využívaných pro aplikaci jsou WC Co, WC Co Cr, WC Ni a další na bázi Co a Ni.<sup>2,3</sup>

# 1 Studie technologie vysokorychlostního nástřiku plamenem – HVOF

Jedno z největších využití získala metoda HVOF jako alternativa k tvrdému chromování. Přednost má především v nižší finanční náročnosti a také v možnosti dosáhnout lepších vlastností. Jedná se především o možnost volby materiálu bez závislosti na základním materiálu, tvorbu hustých povlaků bez povrchových trhlin a ekologičtější aplikaci.<sup>4</sup>

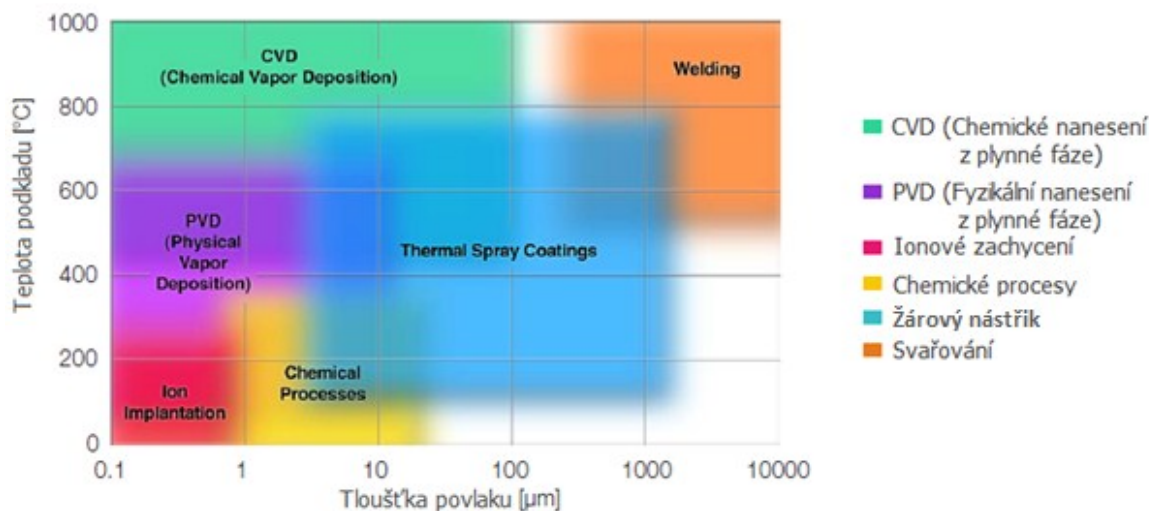
## 1.1 Zařazení HVOF nástřiku

HVOF povlak patří do skupiny žárových nástřiků. Žárový nástřik je termín používaný pro skupinu povlakových vrstev, které k nanášení prášků využívají tepelné energie. Ta slouží k natavení nebo úplnému roztavení nanášeného materiálu, který se přivádí k povrchu substrátu. Na substrátu vzniká usazováním a vrstvením částic nová vrstva materiálu.<sup>5</sup> Obrázek 1 ukazuje teplotu substrátu při použití metody žárových nástřiků v porovnání s ostatními technologiemi, které slouží k nanesení povlaků. Mezi základní technologie žárových nástřiků patří:

- nástřik plamenem,
- vysokorychlostní nástřik metodou HVOF,
- detonační nástřik D-GUN,
- plazmatický nástřik,
- nástřik pomocí elektrického oblouku.<sup>6</sup>

V těchto procesech je možné využít kovové i nekovové povlaky. Procesy je možné rozdělit do dvou hlavních skupin. Členěny jsou podle zdroje energie využívané k nanesení povlaků:

- nástřik pomocí spalování (HVOF),
- nanášení pomocí elektrické energie.



Obrázek 1 – Rozdělení povlaků <sup>7</sup>

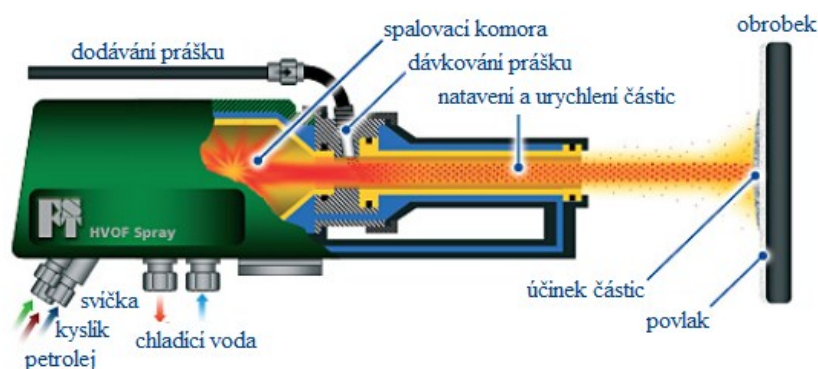
## 1.2 Popis technologie HVOF nástřiku

HVOF, neboli High Velocity Oxygen Fuel, se dá vysvětlit jako vysokorychlostní nástřik plamenem za pomoci kyslíkového paliva. Ovšem kyslík je jen část směsi paliva, které se při aplikaci metody používá.

Princip metody se zakládá na přívodu kapalného nebo plynného paliva společně s kyslíkem do spalovací komory hořáku. Ta bývá chlazená. K chlazení se používá voda nebo vzduch. Ve spalovací komoře dochází k zážehu směsi za pomoci svíčky. Zážeh plynů se realizuje pod vysokým tlakem. Jako plynné palivo se využívá například propan, propylen, vodík, etylen nebo metan. Kapalná složka paliva bývá petrolej. Do směsi se přidává takový druh prášku, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností povlaku. Prášek je do směsi přiváděn pomocí nosného plynu. Jako nosný plyn se využívá argon. Nově vzniklá směs se průchodem přes expanzní trysku urychlí a její rychlost se stává nadzvukovou. Rychlost vzniklého proudu plynu se pohybuje až na úrovni  $2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Již vysoce zahřáté a natavené částčky kovu se tímto proudem přenesou na povrch obrobku, kde se usadí. Na obrobku tak vzniká nová vrstva s vysokou hustotou částic a homogenní strukturou. Vyznačuje se také vysokou tvrdostí a odolností proti korozi. Při aplikaci metody HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) ovšem nedochází k významnému tepelnému ovlivnění podkladové vrstvy. Nemění se tedy vlastnosti původního materiálu. Podle typu

nástřiku se pro finální úpravu povrchu volí dokončovací operace, jako je třískové obrábění, broušení a pokud je to nutné tak i lapování.

Na obrázku 2 je znázorněn princip vysokorychlostního nástřiku. Jedná se o jedno z možných provedení využívaných hořáků.



Obrázek 2 – Princip metody HVOF <sup>8</sup>

### 1.3 Vlastnosti HVOF nástřiků

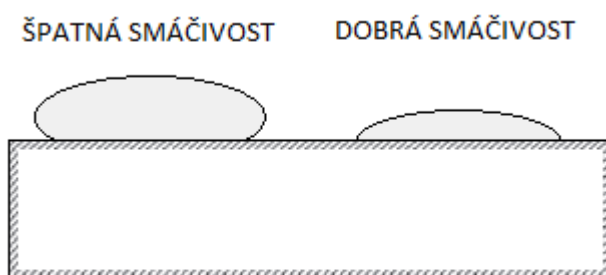
Povlak vzniká přilnutím natavených částic přídavného materiálu na povrch součásti. Vytváří zde kompaktní stálou vrstvu s vysokou odolností. Pokud jsou zvoleny nevhodné procesní parametry, dochází k chybám vzniklým v povrchové vrstvě. Takovéto chyby jsou charakterizovány jako vměstky nebo plynové kapsy. V některých případech se mohou vyskytovat i trhliny. Takové nedokonalosti mohou být způsobeny částčkami obsaženými v prášku. Stává se, že nedojde k dokonalému natavení částic, které se v povrchu usadí právě jako vměstky. Struktura povrchu je dána ulpíváním prášku ve vrstvách na sobě. Každý povlak má jinou strukturu v závislosti na volbě přídavného materiálu a parametrech zvolených pro aplikaci.

Další vlastností ovlivňující nástřik je oxidace. Ovlivňuje ji obsah kyslíku ve složení prášku a také rychlost celé aplikace. Vysoký obsah oxidu má za následek zhoršení soudržnosti povrchu. Ovšem jeho vhodné množství má kladný vliv na odolnost proti opotřebení, mazavost a tvrdost výsledné struktury. Další nežádoucí situace může nastat,

pokud se po dopadu na povrch povlak příliš rychle ochladí a ztuhne. Vlivem vzniklého vnitřního pnutí dochází ke snížení adheze a koheze.

Využití HVOF procesu umožňuje dosažení velmi jemné struktury. I přes to se v povlaku mohou vyskytovat póry. Jejich pórovitost se pohybuje do hodnoty 5 %. Velikou předností této metody je možnost použití velmi jemných prášků, u kterých je pórovitost do 2%. Je tedy možné mluvit o vysoké hustotě nástřiku. Těchto vlastností se dosáhne za použití typických nástřikových parametrů. Vysoké teploty spalování 2 500 až 3 100 °C a schopnosti hmotnostního toku prášku od 2,3 do 14 kg·h<sup>-1</sup>. Účinnost celého systému se pohybuje do 70 %, ovšem u hořáků využívajících petrolejové palivo se hodnota snižuje přibližně na 50 %. Nástřik prášku se provádí ve vzdálenosti 150 až 300 mm od povrchu materiálu. Velikost jeho zrn je různá, pohybuje se v rozmezí hodnot 5 až 45 μm.<sup>9</sup>

Důležitou vlastností stříkaného povlaku je smáčivost. Ovlivňuje vznik pórů ve struktuře nástřiku. Kdyby došlo k nedostatečnému natavení částic, mělo by to za následek nedostatečné přilnutí částic nebo jejich odražení a docházelo by ke špatné smáčivosti. Naopak příliš zahřáté částičky by se mohly odpařovat, což také není žádoucí. V případě, že by nastala jedna z těchto situací, zhoršily by se konečné vlastnosti povlaku. Proto se musí volit kompromis mezi těmito stavy.



Obrázek 3 – Smáčivost prášku<sup>10</sup>

## 1.4 Využití HVOF nástřiků

V dnešní době má metoda HVOF nástřiku velmi široké spektrum využití v jednotlivých průmyslových odvětvích. Jedny z nejčastějších požadavků na povlaky se odvíjejí od použití v daném prostředí. Protože se jedná o žárový nástřik, je nutné tomu

podřítit i tepelnou úpravu podkladové vrstvy. Ta se musí zahřát na teplotu přes 100 °C. Kvůli prostorovému řešení celého systému není technologie vhodná pro nástřik do vnitřních otvorů malých rozměrů. Převážná většina technologie se praktikuje na vnější části různých zařízení.

Uvedeno je několik možností aplikace. Jedná se například o využití v těžebním průmyslu. Používá se k nanesení povlaku na pístní tyče, které pracují ve velmi prašném prostředí a s vysokými tlaky. Proto je požadováno, aby nástřik odolával abrazivnímu opotřebení a aby dobře snášel práci při vysokých tlacích. K tomuto účelu je vhodná slitina niklu s karbidem wolframu, známá jako Super Stelcar od firmy Stellite.<sup>11</sup>

Jedna z dalších velmi užitečných vlastností je odolnost povlaku vůči vysokým teplotám. Vysoké teploty v kombinaci s opotřebením, způsobeným nasáváním vzduchu, se vyskytuje u plynových turbín. Zde je velmi důležité, aby vzniklý povlak měl požadované vlastnosti. V mnoha případech se jedná o velmi složité a rozměrově rozsáhlé konstrukce, které by bylo obtížné a finančně náročné vyměnit. Z tohoto důvodu se přistupuje k technologii vysokorychlostního nástřiku plamenem. Uplatnění zde má prášek Stellite 190 s vysokým obsahem chromu (27 hm%) a wolframu (14 hm%), zajišťující odolnost proti oděru za vyšších teplot, naopak se snižuje odolnost proti korozi.<sup>12</sup>

Oděr a koroze se vyskytují například u kulových ventilů používaných v petrochemickém průmyslu při těžbě ropy. Ventily pracují ve velmi agresivním prostředí a za velkých tlaků. Proto i zde se využívají HVOF nástřiky. Vhodné jsou díky velké spolehlivosti a dlouhé životnosti i v těžkých podmínkách. Pro tuto aplikaci je vhodný druh prášku Stellite 21. Jedná se o slitinu na bázi kobaltu s hmotnostním obsahem chromu od 26 do 29 %.<sup>13</sup>

Mohlo by se uvést mnohem více případů, kde se metoda vysokorychlostního nástřiku využívá. Snad jen stačí dodat, že se s nimi můžeme setkat v letectví zejména u podvozků letadel, při výrobě papíru na vysoušecích a třídících válcích a také v zemědělství nebo v lékařství. Stále se ovšem opakují výsledné vlastnosti, díky kterým se metoda HVOF využívá. Patří k nim odolnost proti abrazivnímu opotřebením, vysokým tlakům a teplotám, odolnost proti korozi a erozi.

## 2 Zařízení používané pro HVOF

Pro aplikaci metody HVOF nástřiku existuje nesčetně systémů. Systém potřebný pro tvorbu nástřiku metodou HVOF využívá několik na sobě závislých částí:

- práškový podavač,
- bezpečnostní systém,
- chladicí okruh (voda, plyn),
- čistící systém,
- ovládací konzole a přívodní hadičky,
- hořák,
- v případě využití petroleje palivové čerpadlo.

### 2.1 Ovládací konzole využívané pro HVOF

Tato kapitola je zaměřena na představení nejrozšířenějších konzolí. Jedná se o přístroje nabízené firmou Kennametal Stellite a firmou Praxair. Zařízení představené firmou Praxair jsou modely JP-5000 a JP-8000, oba pracují s kapalným palivem. Firma Kennametal Stellite uvádí zařízení Jet Kote II a Jet Kote III.

U použitých konzolí se nastavují různé parametry ovlivňující nástřik. Potřebné nastavení parametrů se nachází v návodu dodaném s konzolí. Těmito parametry jsou:

- plnicí tlaky (kyslík, hlavní topný plyn, nosný plyn, vodík),
- konzolové tlaky (kyslík, hlavní palivo, nosný plyn),
- konzolové toky (kyslík, hlavní plyn, nosný plyn),
- konzolové nastavení (kyslík, hlavní plyn, nosný plyn),
- chlazení vodou (vstup, výstup),
- nastavení dopravníku prášku (otáčky, rychlost posuvu),
- vzdálenost stříkání.<sup>14</sup>



### 2.1.1 Zařízení JP-5000

Pro zařízení se využívá kontrolní konzole model 5120. Jedná se o poloautomatické zařízení, které má za úkol jednoduché ovládání parametrů používaných pro provoz (tok paliva, tok chladicí kapaliny, přívod prášku). Pomocí digitálních a dalších měřidel lze snadno stanovit nanášecí parametry a následně dosahovat stále stejných vlastností povrchu. Zařízení pracuje s tekutým palivem.<sup>15</sup>



Obrázek 4 – Konzole JP-5000<sup>16</sup>

### 2.1.2 Zařízení JP-8000

Systém JP-8000 je založený na již fungující verzi JP-5000. Pracuje také především s vysokými tlaky a s nimi související vysokou rychlostí paliva. Obě zmíněné konzole využívají k aplikaci nástřiku hořák 5220, který pracuje se směsí petrolejového paliva. Proces se intuitivně ovládá a je konstantně monitorován.<sup>17</sup>



Obrázek 5 – Zařízení JP-8000 <sup>18</sup>

### 2.1.3 Zařízení Jet Kote II Nova

Cílem systému Jet Kote II Nova se stává efektivnost metody a jednoduchost celého systému. Velikou předností tohoto zařízení je vysoká kvalita nástřiku i při opakovaných aplikacích. Je možné dosáhnout pórovitosti menší než 1 %, která vyplývá z přesné kontroly proměnných procesu. Z toho plyne, že má vzniklý povlak vysokou hustotu a konzistenci. Zařízení pracuje s plynnými palivy, u kterých se volí z několika druhů. Pro dopravu prášku se využívá nosný plyn argon. Přístroj je vyhotoven ve dvou verzích, digitální a analogové.

19



Obrázek 6 – Zařízení Jet Kote II Nova <sup>20</sup>

#### 2.1.4 Zařízení Jet Kote III

Opět se jedná o zařízení pro vytvoření vysoce kvalitního nástřiku. Účinnost systému se pohybuje na úrovni 70 % a je zaručená i při více opakováních. V současné době nabízí široké uplatnění díky schopnosti využít velké množství nabízených prášků. Pro přívod prášku je možné využít argon nebo dusík. Zařízení pracuje s plynnými palivy:

- vodík,
- zemní plyn,
- propylen,
- propan,
- etylen.<sup>21</sup>



Obrázek 7 – Systém Jet Kote III<sup>22</sup>

## 2.2 Hořáky používané k nástřiku metodou HVOF

K nástřiku se používají dva druhy hořáků rozdělené podle využití palivové složky. Jeden typ pracuje s kapalným palivem, tím je směs kyslíku a petroleje. Užívá se pro aplikaci na kulové kohouty a Peltonovy turbíny.

Tabulka 1 – Procesní údaje hořáku s kapalným palivem<sup>23</sup>

<b>Zdroj tepla</b>	kapalné palivo a kyslík
<b>Materiál</b>	kovový prášek
<b>Teplota plamene</b>	cca. 2800 °C
<b>Rychlost částic</b>	400 – 800 m/s
<b>Nanášecí výkon</b>	70 – 200 g/min

Druhý typ hořáku pracuje s plynnými palivy. Jako palivo se používá směs kyslíku a vodíku, propanu nebo propylenu a dalších plynů. Metoda se aplikuje například v leteckém průmyslu.<sup>24</sup>

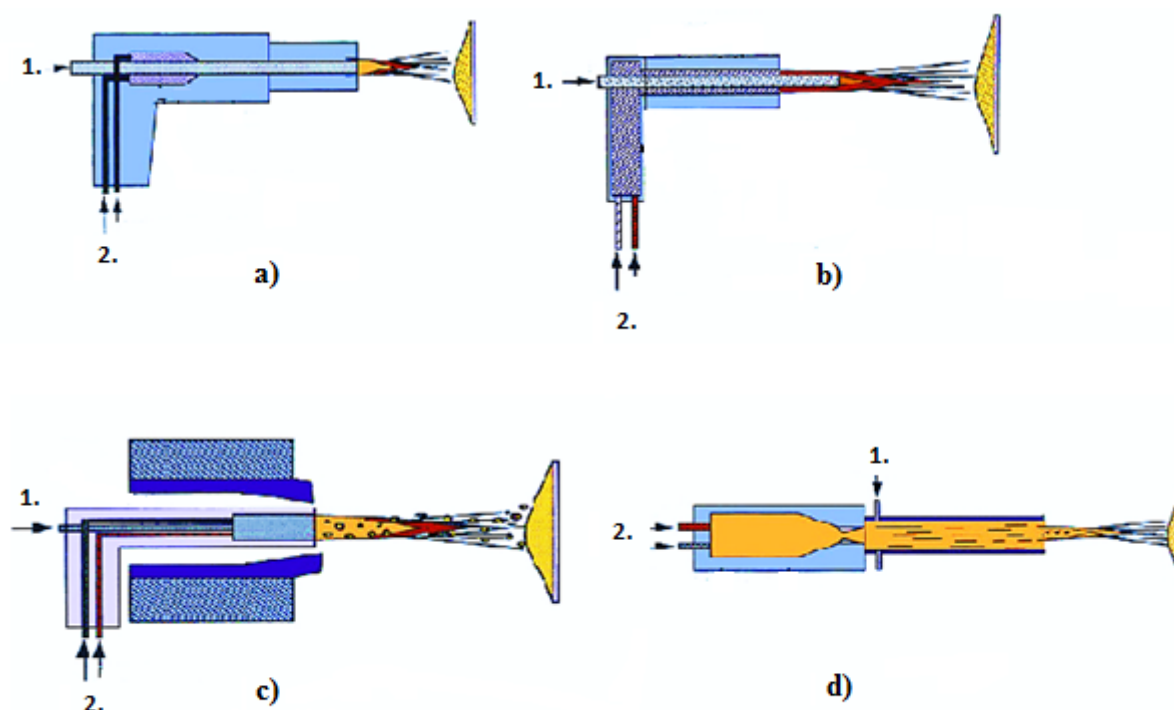
Tabulka 2 – Procesní údaje hořáku s plynným palivem<sup>25</sup>

<b>Zdroj tepla</b>	plynné palivo a kyslík
<b>Materiál</b>	kovový prášek
<b>Teplota plamene</b>	cca. 2800 °C
<b>Rychlost částic</b>	400 – 800 m/s
<b>Nanášecí výkon</b>	40 – 150 g/min

Hořáky jsou také rozděleny do čtyř hlavních skupin podle provedení:

- Jedná se o hořák, kde se přívod prášku, spalovací komora i tryska nachází v jedné rovině. Prášek je stejně jako směs paliva přiváděn do středu spalovací komory. Zde dochází k natavení prášku. Chlazení hořáku je zajištěno vodou.
- V tomto případě je umístěna spalovací komora kolmo od konektoru, který ústí do trysky. V konektoru se nachází směs horkých plynů. Dochází zde ke smíchání prášku s plyny. Následně je směs odváděna tryskou k povrchu součásti.
- Konstrukce hořáku vychází z plamenného hořáku. K chlazení je možné použít vodu i vzduch. Ke spalování dochází v oblasti trysky, kam se přivádí prášek i palivo.
- V posledním případě jde o vysokotlaké zařízení. Pro spalování se používá kapalné palivo, tedy petrolej. Prášek je radiálně přiváděn do proudu plynů, který vystupuje ze spalovací komory. Spalovací komora je chlazená vodou.<sup>26</sup>

Tomuto rozdělení odpovídá obrázek 8 uvedený níže.



Obrázek 8 – Provedení hořáků (pozn. 1. přívod prášku, 2. přívod paliva) <sup>27</sup>

### 3 Rozbor používaných přídavných materiálů a jejich vlastností

Tato kapitola je zaměřena na rozbor přídavných materiálů používaných pro technologii HVOF nástřiků. Uvedeno je zde několik přídavných materiálů. Podrobněji se kapitola soustřeďuje na materiály na bázi kobaltu a karbidu wolframu, zejména pak tři typy prášků. Těmi jsou Tribaloy T-400, T-800 a WC-12% Co-4% Cr.

#### 3.1 Používané přídavné materiály

Pro vysokorychlostní nástřik se používá mnoho přídavných materiálů. Tyto prášky pracují na různých bázích, které jim udávají charakteristické vlastnosti. Výroba prášků je založena na slinování, dělení na určitou velikost a mísení. Do skupiny těchto prášků patří následující zástupci:

- prášky na bázi karbidu wolframu,

- prášky na bázi karbidu chromu,
- prášky na bázi kobaltu (STELLIT, TRIBALLOY),
- prášky na bázi niklu (NISTELLE, TRIBALLOY, DELORO),
- prášky na bázi železa.<sup>28</sup>

Užití povlaků založených na karbidu chromu je možné v místech, kde je snaha dosáhnout vysoce kvalitního povrchu. Využití je podobné jako v případě karbidu wolframu. Nahrazuje tvrdé chromování.

Předností nástřiku s niklovou strukturou je dlouhá životnost. Nanesením prášku na povrch se získávají dobré kluzné vlastnosti. Odolává tedy opotřebení vzniklému třením. Není vhodný do prostředí, kde se pracuje s vysokými teplotami.

Každý uživatel si může vybrat z uvedených prášků. Nejdůležitější informace o těchto práscích jsou:

- velikost zrna,
- chemické a fázové složení,
- vnitřní a vnější morfologie, včetně tvaru a vnitřní pórovitosti,
- vysokoteplotní chování,
- objemová hmotnost a tekutost.<sup>29</sup>

### 3.2 Prášky na bázi WC

Prášky na bázi karbidu wolframu jsou určeny k nahrazení tvrdého chromování. V průmyslu je lze aplikovat v mnoha odvětvích. Využívá se ve velké míře v petrochemickém průmyslu a v oblastech výskytu kyselého prostředí. Příkladem prášku na bázi karbidu wolframu je WC-12% Co-4% Cr.

Tabulka 3 – Chemické složení [% hm]<sup>30</sup>

<b>C</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>	<b>O</b>
5 - 6	11 - 13	3 - 5	< 0,3	< 0,2

Tento prášek má malou nebo střední velikost zrn. Použitelný je do teploty 500 °C. Využívá se jako alternativa pro chromování. Oproti kobaltovým slitinám má vyšší odolnost proti oděru a korozi. Aplikace je tedy možná ve vlhkém korozním prostředí, například na lopatkách turbín, kulových ventilech a částech čerpadel.<sup>31</sup>

### 3.3 Prášky na bázi kobaltu

Užívání materiálů na bázi kobaltu je zvoleno zejména kvůli nahrazení karbidů. Předností těchto prášků bývá nízký bod tání. Pro znázornění uváděných vlastností prášků jsou představeny prášky Tribaloy T-400 a T-800. Oba jsou založeny na bázi kobaltu. Při porovnání těchto dvou prášků jsou zřetelné jejich rozdílné rysy, které je charakterizují.

#### 3.3.1 Tribaloy T-400

Všechny součásti opatřené povlaky z tohoto prášku se vyznačují vysokou odolností. Poměrně časté využití získaly v leteckých motorech, na turbínových lopatkách a v součástech čerpadel. Pro ně splňují celou řadu podmínek. Jednou z hlavních předností je odolnost proti oděru. Využití tedy naleznou v místech, kde se vyskytuje problém s mazáním. Dále pak disponují výbornou odolností proti opotřebení a také trvanlivostí v místech, kde se vyskytuje kavitace a koroze.<sup>32</sup>

Tabulka 4 – Chemické složení [hm %]<sup>33</sup>

<b>C</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe + Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Si</b>
< 0,8	Báze	8,5	< 3	28,5	2,6

Pro nanesení tohoto prášku se využívají různé konzole typu JK (Jet Kote):

- JK II,
- JK II NOVA,
- JK II A.<sup>34</sup>

Při nanášení prášku je důležité nastavit vhodné parametry u těchto konzolí. Různě nastavené parametry mají za důsledek odlišné vlastnosti povlaku. Parametry se tedy volí

podle toho, jaké jsou konečné požadavky na povlakovou vrstvu. U jednoho z možných nastavení lze dosáhnout vlastností uvedených v tabulce 5.

Tabulka 5 – Vlastnosti nástřiku <sup>35</sup>

<b>Pevnost vazby [kPa]</b>	62 052 – 71 016
<b>Mikrotvrdost (300g) [HV]</b>	584 – 674
<b>Makrotvrdost (15N) [HV]</b>	87 – 91
<b>Potencionální pórovitost [%]</b>	< 1
<b>Maximální tloušťka povlaku [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	508
<b>Předpokládaná maximální teplota [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>	760
<b>Předpokládaná účinnost naneseného povlaku [%]</b>	55
<b>Oxidační stupeň</b>	nízký

### 3.3.2 Tribaloy T-800

Jedná se o další prášek z řady Tribaloy. Výraznou předností tohoto prášku je jeho velká jemnost. Díky jeho složení je možné dosáhnout ve vytvořeném povlaku nízkého obsahu oxidů. Tohoto prášku se využívá u různých součástí pro čerpadla a díly pro palivové systémy. Přesněji v místech, kde dochází ke vstřikování paliva, například palivové trysky. Dále se dá aplikovat u turbín k rekonstrukci poškozených lopatek. <sup>36</sup>

Tabulka 6 – Chemické složení [hm %] <sup>37</sup>

<b>C</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe + Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Si</b>
< 0,8	Báze	17,5	3	28,5	3,4

V tomto případě je důležité, že se smí pro nanesení tohoto prášku využít jako palivová složka pouze vodík. Práce se provádí na konzolích typu JK (Jet Kote):

- JK II,
- JK II A. <sup>38</sup>

V následující tabulce 7 se nachází vlastnosti, které lze dosáhnout využitím prášku Tribaloy T-800. Údaje jsou pouze orientační. Opět záleží na volbě parametrů určených pro nástřik.



Tabulka 7 – Vlastnosti nástřiku <sup>39</sup>

<b>Pevnost vazby [kPa]</b>	58 605
<b>Mikrotvrdost (300g) [HV]</b>	713
<b>Makrotvrdost (15N) [HV]</b>	91,2
<b>Potencionální pórovitost [%]</b>	< 1
<b>Maximální tloušťka povlaku [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	-
<b>Předpokládaná maximální teplota [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>	538
<b>Předpokládaná účinnost naneseného povlaku [%]</b>	-
<b>Oxidační stupeň</b>	střední

Protože po ukončení aplikace prášku není povrch zcela rovný, je možné využít dokončovací operace k jeho úpravě. Nejprve na řadu přichází soustružení nebo broušení. Po té se může přistoupit k lapování. Při těchto úpravách povrchu je důležité dodržet přesné parametry, aby nedošlo k poškození vzniklého povrchu. Parametry pro dokončovací operace jsou uvedeny v materiálových listech aplikovaných prášků.

## 4 Charakteristika materiálů a zařízení určených k experimentu

V této části práce jsou uvedeny materiály určené k ověření vlastností HVOF nástřiku. Jedná se o prášky Amperit 529 a Praxair Co-109-7. Povlak byl vytvořen na ocel 1.4301. Její vlastnosti jsou také popsány níže. Pro nanesení těchto prášků bylo využito konzole JP-5000.

### 4.1 Vlastnosti základního materiálu

Pro experimentální ověření užitných vlastností HVOF nástřiku je zvolen jako substrát austenitická ocel 1.4301 (17 240). Jedná se o korozivzdornou ocel s vysokým obsahem chromu a niklu. Oceli třídy 17 „jsou většinou určeny pro součásti elektrických a energetických zařízení v průmyslu kvasném, potravinářském, farmaceutickém, chemickém, na chirurgické nástroje, na nemagnetické (magneticky měkké oceli) nebo naopak magnetické (magneticky tvrdé oceli) součásti.“ [40] Dalo by se tedy říci, že ocel

má velké uplatnění v těch odvětvích průmyslu, kde je kladen důraz na vysokou čistotu součástí.

Za velmi kladnou vlastnost oceli se považuje dobrá tvářitelnost. Naopak obrábění je obtížné, proto se musí k obrábění používat tvrdé nástroje. Těmi mohou být slinuto karbidové destičky nebo rychlořezné oceli s vysokým obsahem legujících prvků. „Ocel má sklon ke zpevňování za studena při tažení, nebo při třiskovém obrábění nevhodnými řeznými podmínkami. Zpevnění vzniká přetvořením austenitu na deformační martenzit, který zvýší pevnost, sníží tažnost.“ [41] Uplatnění ocel najde až při teplotách do 350 °C. V níže uvedených tabulkách jsou znázorněny charakteristické parametry tyčí vyrobených z oceli 1.4301.

Tabulka 8 – Mechanické vlastnosti pro ocel 17 240 <sup>42</sup>

<b>Průměr d [mm]</b>	< 60	60 – 100	100 – 150
<b>Tažnost A<sub>5</sub> [%]</b>	50	45	40
<b>Mez kluzu R<sub>p</sub> 0,2 [MPa]</b>	186		
<b>Mez pevnosti R<sub>m</sub> [MPa]</b>	490 – 686		

Tabulka 9 – Chemické složení pro ocel 17 240 [hm %] <sup>43</sup>

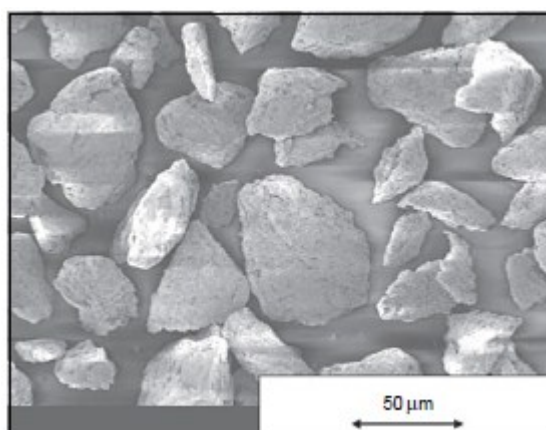
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
max. 0,07	max. 2	max. 1	17 – 20	9 – 11,5	max. 0,045	max. 0,03

## 4.2 Vlastnosti materiálů použitých pro nástřik metodou HVOF

Následující bod přibližuje vlastnosti použitých přídatných materiálů. Základní materiál byl opatřen prášky Praxair Co-109-7 a Amperit 529. K základním vlastnostem a přednostem těchto prášků patří vysoká tvrdost nanesené vrstvy. Mezi další důležité vlastnosti lze zařadit vysokou odolnost proti korozi zejména ve slané vodě a odolnost proti vysokým teplotám. Tyto vlastnosti jsou dány především chemickým složením použitých prášků.

### 4.2.1 Amperit 529

Jedná se o prášek na bázi karbidu wolframu s vysokou odolností proti korozi. V prášku je použita příměs kobaltu. Kobalt má v prášku důležitou vlastnost. Tou je nižší teplota tavení než u karbidu wolframu. Důsledek zmíněné vlastnosti je, že nedochází k roztavení karbidu, ten se dostává na povrch materiálu ve společnosti roztaveného kobaltu. Na povrchu materiálu ulpí v kobaltu, který zajistí pevnou adhezi. Tím, že nedochází k natavení wolframu, neztrácí svou tvrdost. Hodnota její velikosti se pohybuje kolem 1 100 HV. Je závislá nejen na množství kobaltu a karbidu wolframu, ale také na jeho rozložení.



Obrázek 9 – Struktura prášku <sup>44</sup>

Tabulka 10 – Chemické složení Amperit 529 [hm %] <sup>45</sup>

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>Fe</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>O</b>
5 – 5,6	2 – 3,5	0,3 – 0,6	0,8 – 1,5	2 – 3,5	10 – 12,5	<= 0,2

### 4.2.2 Praxair Co-109-7

Prášek Praxair Co-109-7 je založen na kobaltové bázi. Prášek je velice podobný prášku Tribaloy T-400. Po aplikaci má povlak dobrou odolnost a zachovává si své vlastnosti až do teploty 800 °C. koeficient tření vzniklého povrchu je velmi malý. <sup>46</sup>

Tabulka 10 – Chemické složení Praxair Co-109-7 [hm %] <sup>47</sup>

<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>C</b>	<b>Fe</b>	<b>Ni + Fe</b>	<b>Mo</b>
Balance	7,5 – 9,5	0,08	1	0,5 – 1,5	27 - 30
<b>Ni</b>	<b>O</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Ostatní</b>
1	0,15	0,03	0,03	3	0,5

Tabulka 11 – Vlastnosti prášku Praxair Co-109-7 <sup>48</sup>

<b>Pevnost vazby</b> [kPa]	48 256
<b>Mikrotvrdost</b> (300g) [HV]	min. 384
<b>Drsnost po nastříkání</b> [Ra]	200 – 350
<b>Zdánlivá hustota</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	3,2
<b>Teplota tání</b> [°C]	1 343 – 1 357

### 4.3 Zařízení využité k nástříku

Pro nanesení povlaku metodou HVOF byl využit systém JP – 5000. Prášek se do přístroje přivádí radiálně přímo do spalovací trysky, kde dochází k jeho snadnějšímu promíchání. Proud plynů dosahuje rychlostí 2 190 m/s. Příčinou tak vysoké rychlosti je tlak ve spalovací komoře 820 kPa. <sup>49</sup>

Zařízení pracuje s vysokým spalovacím tlakem, od kterého se odvíjí vysoká rychlost plynů a s tím spojená rychlost částic. Proto metoda zajišťuje výbornou kvalitu nástříku. Díky vysoké rychlosti částic vzniká na povrchu součásti kompaktní vysoce hustý nástřík s nízkým obsahem oxidu a dobrou odolností proti korozi. Konzole pracuje s kapalným palivem. Petrolej se využívá za účelem snížení nákladů a také proto, že zvyšuje bezpečnost práce. Systém JP – 500 charakterizují specifické vlastnosti:

- vylepšení povlaku,
- vyloučení pórovitosti v metalické fázi,
- zesílení vazby,
- účinnost až 70 %,
- vyšší sazba prášku
  - metalická (11,3 kg/h),
  - karbid wolframu (9,1 kg/h),
  - karbid chromu (7,3 kg/h),

- menší citlivost na velikost prášku,
- výborná celistvost a jednotnost povlaku,
- lepší přilnavost,
- zvýšená tvrdost a odolnost proti opotřebení.<sup>50</sup>

## 5 Ověření užitných vlastností HVOF nástřiků

Celá kapitola je zaměřena na ověření specifických vlastností HVOF nástřiků pro konkrétní přídavný materiál. K užitným vlastnostem HVOF nástřiků patří především zvýšení povrchové tvrdosti materiálu. Dále to pak může být ochrana vůči vnějším poškozením, kterými mohou být mechanické opotřebení, například abraze, nebo chemické opotřebení. Také se zlepší odolnost při vysokých teplotách. K ověření vlastností nástřiku slouží následující experiment.

### 5.1 Návrh experimentu

Experiment je zaměřen na vlastnosti vzniklého nástřiku dvou typů vzorků prášků na bázi kobaltu a karbidu wolframu. Oba prášky, jak Amperit 529 tak Praxair Co-109-7 byly nanášeny na tyč kruhového průřezu z materiálu, kterým je ocel 1.4301. Z těchto tyčí je nutné připravit si dva vzorky, u kterých bude možné zjistit požadované vlastnosti. Experiment se soustředí na tři oblasti: metalografii povlaků, hodnocení tvrdosti a kontrolu tloušťky povlaku.

Vzorkem pro zkoušení vlastností povlaků byla tyč kruhového průřezu o průměru 60 mm. Vrstva nástřiku se aplikovala na povrch tyče. Pro experiment se zhotovily dva vzorky. Jeden pro každý nástřik. Vzorky měly velikost 12 mm × 12 mm. Každý zahrnuje základní materiál společně s vrstvou povlaku. Příprava experimentu obsahuje několik kroků. Na začátku je provedeno dělení, aby bylo dosaženo požadované velikosti vzorku. Následující krok zahrnoval zalisování vzorků pro zajištění rovinné plochy vzorku. Pokračovalo se broušením a leštěním a nakonec došlo k naleptání vzorku. Pomocí leptání byla zajištěna zřetelná struktura vzorků.

## 5.2 Příprava experimentu

Příprava materiálu před provedením experimentu se prováděla v laboratoři s potřebným vybavením přístroji značky Struers. V následujících krocích je popsán průběh procesů sloužících k vytvoření vzorků. Oba vzorky se připravovaly obdobným způsobem na stejném vybavení.

### 5.2.1 Dělení materiálu

Dělení materiálu probíhalo na zařízení Struers typu Discotom-6. Jde o řezací zařízení, které využívá brusný kotouč pro dělení materiálu. Tato technologie byla použita, protože bylo známo, že se bude dělit ocel 1.4301 poměrně malého průměru. Materiál je obtížně obrobitelný a navíc se na povrchu nachází povlak tvořený kobaltovým práškem, který tvrdost zvyšuje. Za nezbytné se považuje použít řezný kotouč se zvýšenou tvrdostí. Aby bylo možné vzorek oddělit, pohybuje se rychlost řezání na minimálních hodnotách. Důvod, proč se nastavují nízké řezné parametry, je také, aby nedošlo k poškození vzorků z důvodu vysokého zahřátí součástí. To by mělo za důsledek ovlivnění mikrostruktury a zkreslilo by to výsledky experimentu. Obrázek 10 znázorňuje stroj použitý k dělení materiálu.



Obrázek 10 – Struers Discotom-6<sup>51</sup>

### 5.2.2 Zapékání vzorků

Zapékání vzorků zajistil přístroj ProntoPress-20 (Obrázek 11). Pro zapečení vzorků se použil prášek MultyFast Red. Jedná se spíše o malé granule na bázi plastu, které se roztaví a obklopí vzorek. Tato operace je důležitá z důvodu zjednodušení následné manipulace se vzorky. Vzorky se zapekly do tvaru válečku s dvěma rovinnými plochami na koncích. Tvar válečku je nutný, protože následující operace broušení vyžaduje právě válcový tvar, který je nutný z důvodu ustavení vzorku v brousící hlavě. Rovinná plocha je významná pro zajištění kvalitního snímku při sledování mikrostruktury povrchu a dalších experimentů.



Obrázek 11 – Struers ProntoPress-20 <sup>52</sup>

### 5.2.3 Broušení a leštění vzorků

K broušení se stejně jako k leštění vzorků použil univerzální přístroj TegraForce-5 v kombinaci s přístrojem TegraPol-35 (Obrázek 12). Broušení obsahovalo pět operací. Na každou operaci byla použita rozdílná řada brusného papíru. To znamená, že každý papír obsahoval rozdílnou velikost brusných zrn. V první řadě byl použit brusný papír s hrubými zrny. Dále se postupovalo pomocí čtyř postupně jemnějších brusných papírů. Operace zahrnovala při každém papíru cyklus broušení třikrát tři minuty. Mezi jednotlivými přestávkami v cyklu se musel vzorek očistit, aby nedošlo k poškození již odbroušenými zbytky materiálu. Poslední operace zahrnovala leštění vzorku leštící utěrkou. Leštění se opět provádí v cyklu po třech opakováních. Zmíněný sled operací pomohl upravit povrch vzorku tak, aby se na něm nevyskytovaly nerovnosti po odřezání. Snížila se také rapidně drsnost povrchu a eliminovaly se škrábance na povrchu. Leštění pomohlo ke konečnému očištění povrchu. Díky tomuto postupu se podařilo docílit zrcadlového lesku vzorků.



Obrázek 12 – Struers TegraForce-5 v kombinaci s TegraPol-35<sup>53</sup>

#### 5.2.4 Leptání

Samotné broušení povrchu vzorků ještě nezaručí zcela jasný obraz při pozorování mikrostruktury. Proto se před provedením experimentu musí přistoupit ještě k leptání. „Leptání je proces, při kterém dochází ke zviditelnění jednotlivých strukturních součástí. Struktura kovového materiálu je po mechanickém broušení a leštění zakryta tvářenou vrstvou. Abychom mohli strukturu pozorovat, je třeba tuto vrstvu chemicky odstranit.“<sup>54</sup> Leptání se provedlo za pokojové teploty a byly k němu použity různé druhy kyselin. Volba kyseliny závisela na tom, jaký je použit druh přídavného materiálu. Tedy na materiálu nastříkané vrstvy. Při hledání vhodného druhu kyselin pro leptání se postupovalo podle odborné literatury [Píšek, 1959].



Obrázek 13 – Konečná podoba vzorků

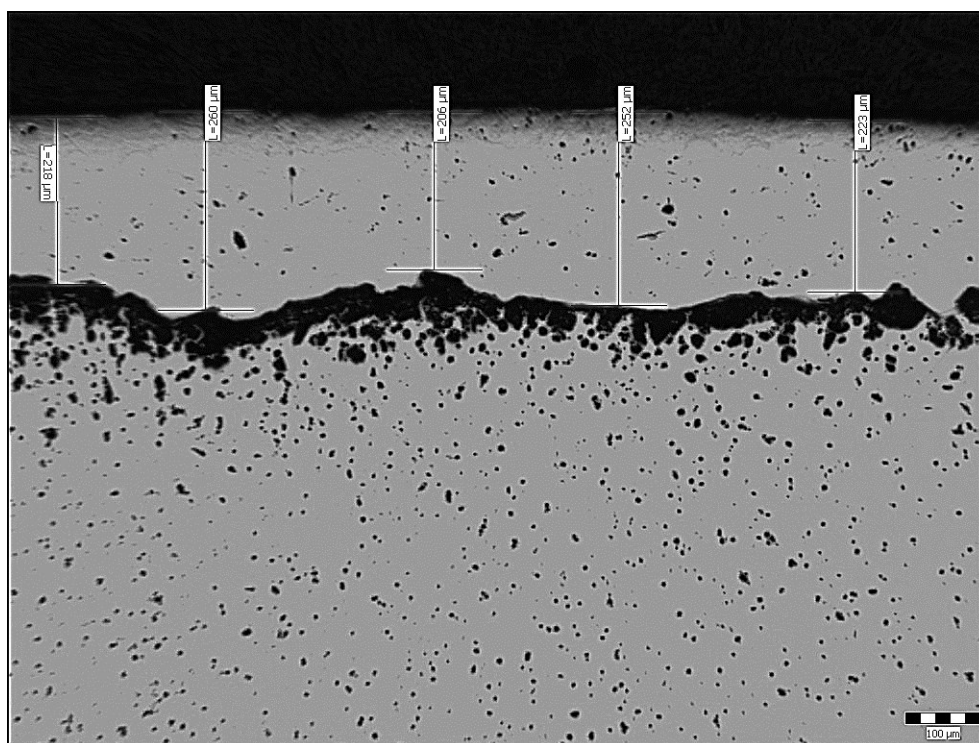


## 5.3 Provedení experimentu

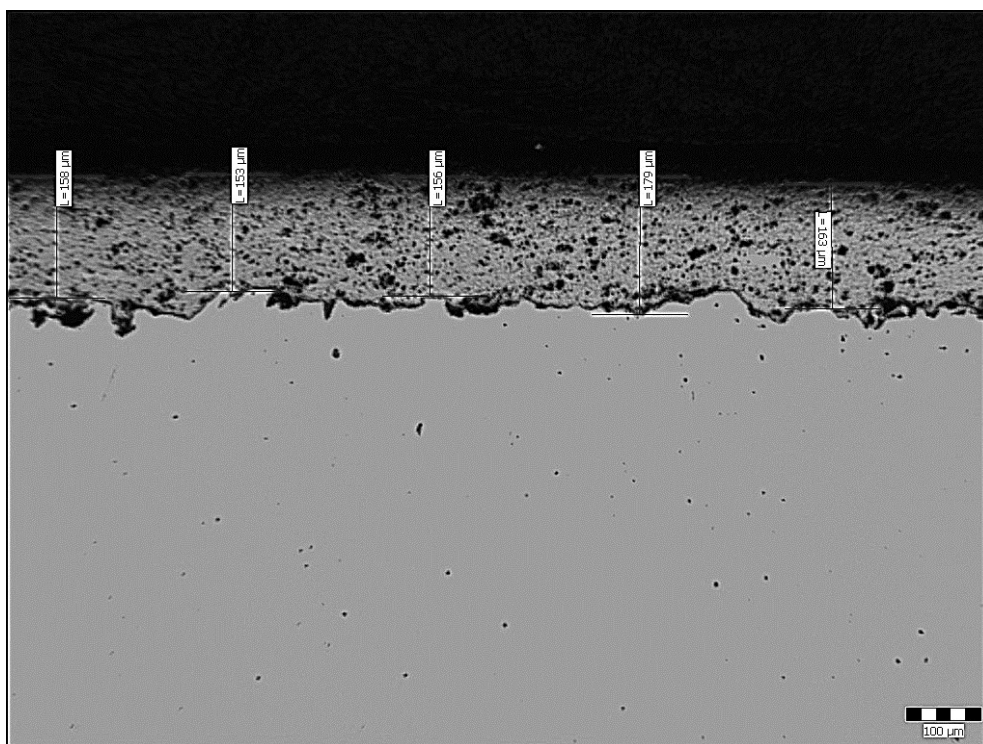
Experimentální část byla provedena v laboratořích VŠB – TUO za využití dostupných přístrojů. Zahrnuje zkoumání mikrostruktury, tloušťky a tvrdosti nástřiku prášku na bázi Co a WC nanesených metodou HVOF.

### 5.3.1 Měření tloušťky nanesené vrstvy nástřiku

Měření tloušťky nástřiku bylo uskutečněno metodou zvanou světelná mikroskopie. Experiment probíhal na dvou připravených vzorcích. Obrázky 14 a 15 ukazují naměřené hodnoty na každém z těchto vzorků. Tyto obrázky jsou zobrazeny v padesátinásobném zvětšení. Na každém obrázku se nachází pět naměřených hodnot. Právě pět hodnot je zvoleno proto, aby bylo dosaženo přesnější podoby tloušťky nanesené vrstvy. Pro větší přehlednost jsou tyto hodnoty zpracovány v tabulce 13. Tabulka je zařazena pod oběma obrázky.



Obrázek 14 – Tloušťka nástřiku prášku Praxair Co-109-7



Obrázek 15 – Tloušťka nástřiku prášku Amperit 529

Z tabulky 13 lze vyčíst, že oba vzorky mají poměrně malou tloušťku nanesené vrstvy prášku. Nástřik prášku Praxair Co-109-7 má po zprůměrování naměřených hodnot tloušťku 231,8  $\mu\text{m}$ . Prášek Amperit 529 má průměrnou hodnotu tloušťky o něco nižší, a to je hodnota 161,8  $\mu\text{m}$ .

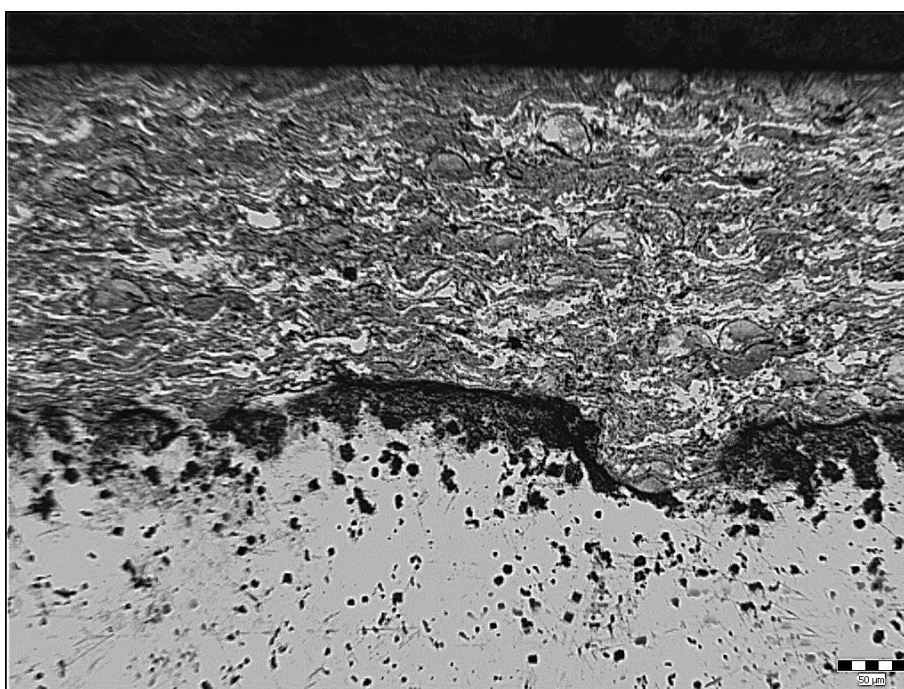
Tabulka 13 – Tloušťka nástřiku

Měření	Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ] Praxair Co-109-7	Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ] Amperit 529
1	218	158
2	260	153
3	206	156
4	252	179
5	223	163
<b>Průměrná hodnota</b>	231,8	161,8

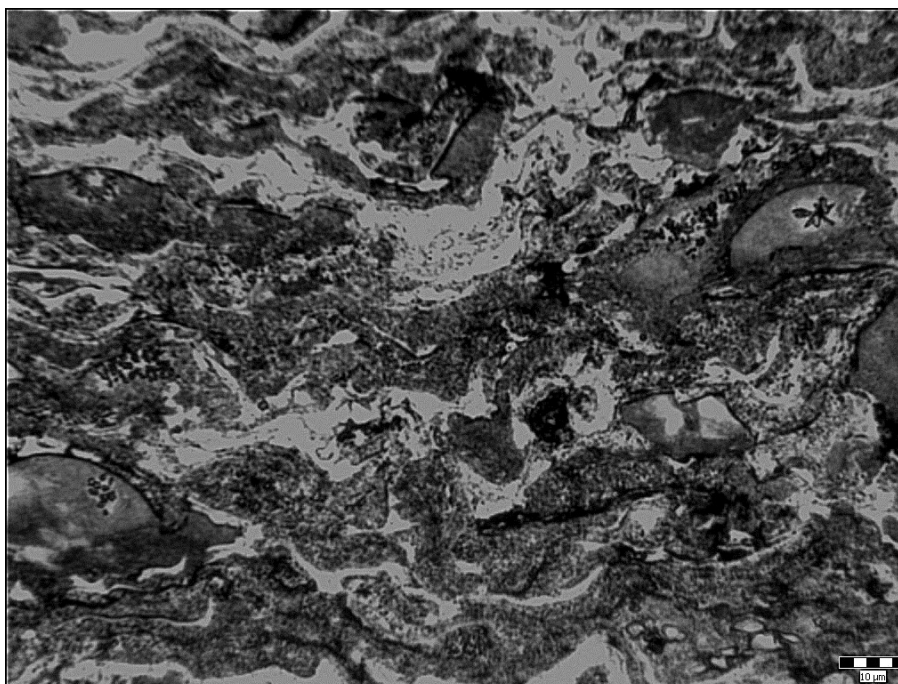
### 5.3.2 Zkoumání mikrostruktury

Pozorování mikrostruktury bylo prováděno pomocí metalografického mikroskopu Neophot 21. Výsledkem tohoto pozorování byl snímek v různých velikostech zvětšení. Zvětšení je uvedeno u každého obrázku. Pro vylepšení kontrastu a snadnější čitelnost snímku při vyvozování závěrů se upravila jejich barva na černobílou, jak je vidět na přiložených snímcích.

Následující dva obrázky 16 a 17 představují nástřik prášku Praxair Co-109-7. Na prvním se nachází jak základní materiál, tak i přídavný materiál. Na dalším snímku je již znázorněna pouze nanesená vrstva prášku. Ani na jednom z pořízených snímků nejsou znatelné nějaké trhliny. Povrch se zdá být kompaktní. Při aplikaci prášku nedošlo k difuzi složek prášku do základního materiálu, ten zůstal téměř neovlivněn použitou technologií. Na obrázku 16 je možné pozorovat heterogenní strukturu, v které se místy nachází póry. Následně na obrázku 17 jsou v levé spodní části a v pravé horní části viditelné v šedé fázi lehce zřetelné vměstky karbidu.

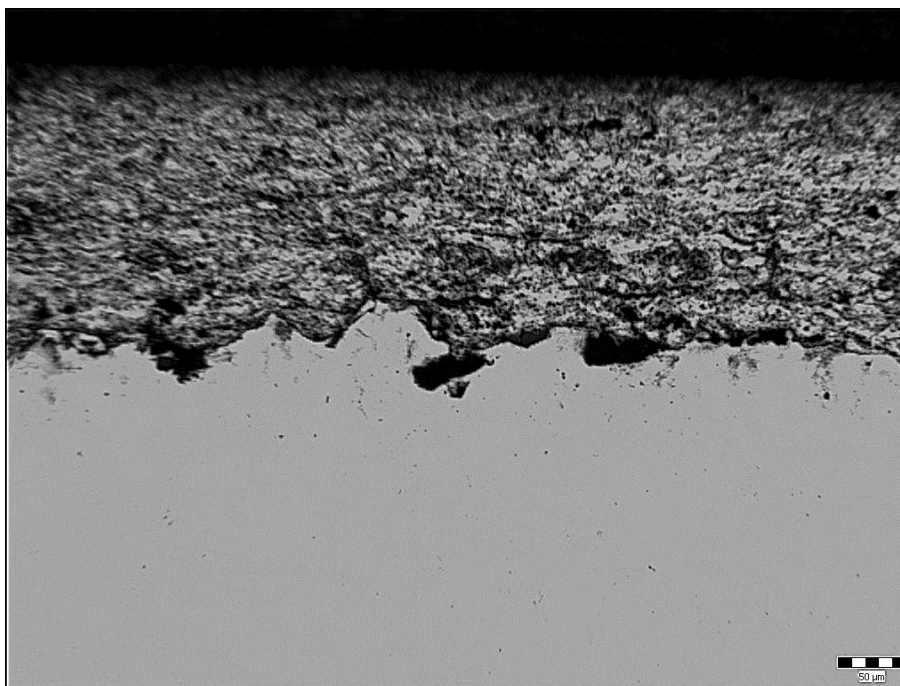


Obrázek 16 – Mikrostruktura prášku Praxair Co-109-7 (Zv. 100x)



Obrázek 17 – Mikrostruktura prášku Praxair Co-109-7 (Zv. 500x)

Na obrázcích číslo 18 a 19, na kterých je nanesen prášek Amperit 529 opět nejsou zřetelné žádné trhliny. Metodou HVOF byl vytvořen kompaktní nástřik s poměrně hustou strukturou. Vzhledem k tomu, že je prášek z různých druhů kovových složek, je z obrázku čitelná heterogenní struktura nástřiku. Na obrázku 18 je zobrazena vrstva nástřiku společně se základním materiálem. Zde je možné vidět, že nedošlo ke zjevnému natavení základního materiálu při aplikaci vrstvy nástřiku. Také je dobře patrné, že složky prášku nedifundovaly do základního materiálu.



Obrázek 18 – Mikrostruktura prášku Amperit 529 (Zv. 100x)

Druhý snímek je zobrazen ve výraznějším zvětšení než předchozí a je z něj čitelná pravidelná, velice jemná struktura. Ve stavbě nástřiku je možné pozorovat obsah pórů a také vznik oxidických vměstků. Tyto vady se nevyskytují ve velkém množství, takže se dá povlak považovat za kompaktní a nijak nepoškozený.



Obrázek 19 – Mikrostruktura prášku Amperit 529 (Zv. 500x)

### 5.3.3 Měření mikrotvrdosti

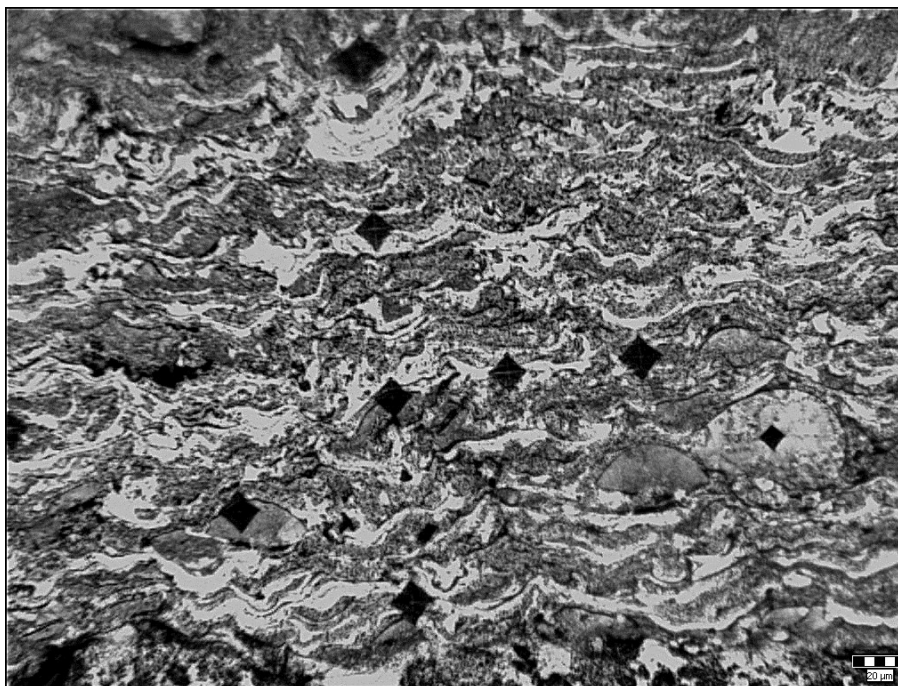
Termín tvrdost by se dal vysvětlit jako schopnost materiálu odolat vniknutí cizího tělesa. Měření mikrotvrdosti použitých nástřiků je poměrně jednoduché a předem může odhalit kvalitu vzniklého povlaku. V oblasti mikrotvrdosti „se tvrdost měří metodou podle Vickerse se zatížením v rozsahu 0,98N až 49N – HV0,1 až HV5.“ [56]

V tomto případě byla použita hodnota zatížení HV 0,1. Malé zatížení bylo zvoleno z důvodu, že vrstva nástřiku je velice úzká. Na každém vzorku bylo provedeno devět měření, které by měly přiblížit tvrdost těchto dvou nástřiků. Dále na obrázcích 20, 21 jsou znázorněny vpichy po diamantovém hrotu jehlanu, tedy místa, kde došlo k měření tvrdosti.

Tabulka 14 – Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse

<b>Praxair Co-109-7</b> <b>[HV]</b>	<b>Amperit 529</b> <b>[HV]</b>
680	788
755	913
721	1120
768	791
634	1112
796	825
713	1116
788	995
670	1023

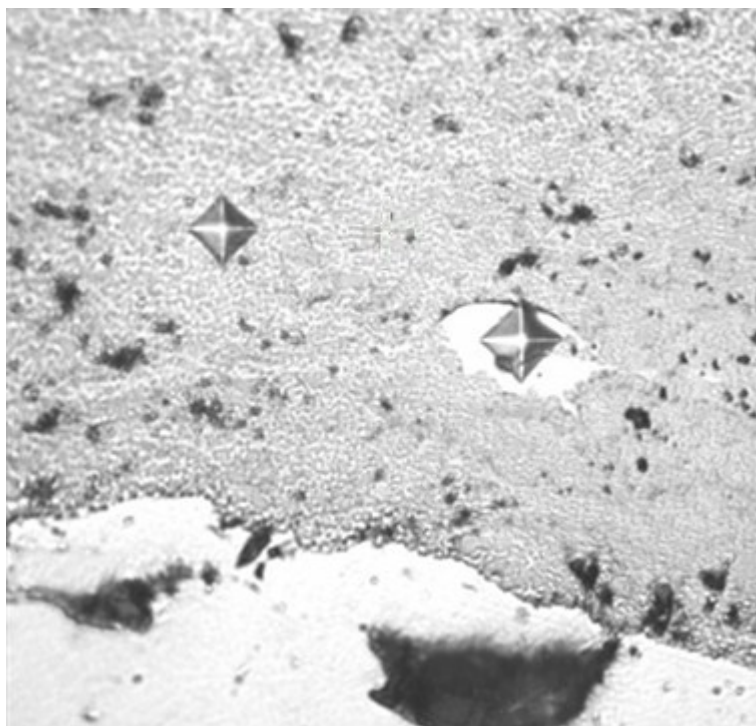
Z tabulky 14 je patrné, že HVOF nástřik prášku Praxair Co-109-7 má určitý rozptyl naměřených hodnot tvrdosti. Hodnoty se pohybují v rozmezí od 634 do 796 HV. Tyto odchylky v měření jsou způsobeny kompozitní strukturou použitého materiálu. Na obrázku 16 jsou patrné rozličné oblasti nástřiku, které byly použity k měření. Obrázek pochází z části experimentu, kdy byla sledována mikrostruktura nástřiku. Zvolen byl proto, aby bylo jednoznačně patrné, kde se vpichy nachází. Dále je na totožném obrázku blízko pravého okraje vidět vpich ve světlém půlkruhovém místě, kde bylo užito měření se zatížením HV0,05. Výsledkem měření bylo, že naměřená hodnota tvrdosti vzrostla na 898 HV.



Obrázek 20 – Prášek Praxair Co-109-7

Následující obrázek 20 znázorňuje, jakým způsobem probíhalo měření vzorku s vrstvou nástřiku Amperit 529. Jak už je vidět v tabulce 14, tak naměřené hodnoty mají větší rozsah. Jelikož se jedná o kompozitní materiál s jemnější strukturou, tak dosahuje tvrdost tohoto nástřiku vyšších hodnot. Jedná se o hodnoty z tabulky 14 v rozmezí 913 HV až 1120 HV, které byly naměřeny právě v kompozitu. Zbylé hodnoty z tabulky od 788 HV do 825 HV byly naměřeny v bílé fázi uvnitř struktury tohoto nástřiku. Pro lepší představu je přiložen obrázek 21 přímo z měření mikrotvrdosti. Snímek byl pořízen v tisícinásobném zvětšení.





Obrázek 21 - Prášek Amperit 529

## 6 Vyhodnocení dosažených výsledků

V bakalářské práci byly zkoumány tři oblasti vlastností nástřiku. Nejdříve je uveden výsledek měření tloušťky nástřiku. Průměrná hodnota tloušťky nástřiku druhu Praxair Co-109-7 vycházela 231,8  $\mu\text{m}$  a Amperit 529 byla 161,8  $\mu\text{m}$ . Obě výsledné hodnoty odpovídají parametrům popsaných výrobcí těchto přídavných materiálů.

Stejně tak dopadlo i měření tvrdosti, také bylo dosaženo srovnatelných výsledných hodnot s těmi přiloženými v materiálových listech. Hodnoty tvrdosti v případě prášku Praxair se pohybovaly kolem hodnoty 700 HV a následně u povlaku Amperit byl výsledek okolo 1 000 HV. Odchyly, ke kterým došlo při měření, jsou způsobeny ne zcela jednotnou strukturou povlaku a zejména měřením tvrdosti při malém zatížení.

Nakonec při zkoumání mikrostruktury bylo zjištěno, že došlo na pohled k dobrému přilnutí obou povlaku k základnímu povrchu, aniž by došlo k jeho výraznému tepelnému ovlivnění. Ani jeden z nástřiků nevykazuje žádné stopy po trhlinách. Pouze v nich je viditelná lehce pórovitá struktura, která místy obsahuje karbidické a oxidické vměstky. Povlak prášku Amperit 529 je tvořen jemnou zrnitou strukturou. Dána je karbidy



wolframu, které nejsou všechny zcela nataveny a usazují se v povlaku. Tím vytváří charakteristickou zrnitost. Oproti tomu prášek Praxair Co-109-7 založený na kobaltové bázi má nižší teplotu tavení. Proto vzniká jakoby tekutější struktura nástřiku, která je pro něj typická.

## **Závěr**

Tématem bakalářské práce je hodnocení vybraných vlastností HVOF nástřiků. Pro ověření vlastností byly vybrány prášky Praxair Co-109-7 a Amperit 529 nanesené pomocí přístroje JP-5000. Základními vlastnostmi a zároveň výhodami těchto prášků jsou vysoká tvrdost a odolnost proti oděru. K dalším důležitým vlastnostem patří vysoká odolnost proti korozi zejména ve slané vodě (Amperit) a odolnost proti vysokým teplotám (Praxair). U těchto prášků je také možné se spolehnout na vysokou hustotu a stabilitu povlaku bez výrazných vad.

Celá práce je členěna do dvou výrazných částí. A to na teoretickou část a praktickou experimentální část. Teoretická část se soustřeďuje na studii samotné technologie vysokorychlostního nástřiku HVOF. V první řadě dochází k zařazení nástřiku do odvětví nanášení povlaků a přiblížení principu metody a jejich vlastností. Dále je zde uvedena charakteristika přístrojů a jejich základní parametry sloužící k nástřiku. V následující kapitole se provádí rozbor vybraných přídavných materiálů a jejich vlastností na bázi kobaltu a karbidu wolframu. Podrobně jsou představeny prášky Tribaloy T-400 a Tribaloy T-800. U těchto prášků se uvádějí jejich možné vlastnosti.

V praktické části je realizován experimentální program, pomocí kterého se ověřují užité vlastnosti HVOF nástřiku. V bakalářské práci dochází k popisu přípravy vzorků. Ty byly pro experimentální ověření vlastností opatřeny prášky Amperit 529 a Praixar Co-109-7. U těchto prášků se zkoumá tvrdost a tloušťka vzniklého povlaku a také jeho mikrostruktura. Následně jsou výsledky experimentu vyhodnoceny.

Při použití konzole JP-500 se prášky Praxair Co-109-7 a Amperit 529 nanasly na povrch materiálu oceli 1.4301 (17 240). Jejich tloušťka i tvrdost odpovídala předpokládaným vlastnostem popsaných výrobcí. Materiál Co-109-7 vykazoval tvrdost pohybující se v malém rozptylu kolem hodnoty 700 HV. Tloušťka vzniklé vrstvy vyšla v průměru 231,8  $\mu\text{m}$ . Prášek Amperit 529 má větší rozptyl tvrdosti. Střední hodnota se nacházela kolem 1 000 HV, což odpovídá povlaku s vysokým obsahem karbidu wolframu. Jeho tloušťka dosáhla průměrné hodnoty 161,8  $\mu\text{m}$ .

Mikrostruktura měla vnitřní složení charakteristické pro jednotlivé prášky a nevykazovala žádné praskliny. Viditelné byly drobné poruchy, kterým se nedalo zabránit. Ty ale neohrožují vzniklý povrch. Ve vzniklých povlacích se v některých oblastech objevily vměstky tvořené oxidy a karbidy. Místy se vyskytlo také velice malé množství pórů. V povrchu základního materiálu nebyla zřetelná difuze nástřiku.

Na základě uvedených měření a pozorování lze po porovnání s uvedenými vlastnostmi od dodavatelů prášků shledat získané výsledky uspokojivými a provedený experiment tedy úspěšným. Aplikace použitých prášků podmíněná dosaženými výsledky při zkouškách se považuje za doporučenou. Využití je možné v místech vyžadujících vysokou povrchovou tvrdost a dobrou odolnost proti oděru a opotřebení. Uplatnění se nachází i v místech, kde působí na součásti vysoká teplota nebo chemicky náročné prostředí.

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Vladislavu Ochodkovi za pomoc při přípravě vzorků a udělování odborných rad a konzultací při psaní bakalářské práce. Dále děkuji paní Ing. Xénii Ševčíkové za profesionální přístup a odbornou pomoc při provedení experimentu.

## Použité prameny

- [1] DAVIS, Joseph R. ASM INTERNATIONAL. *Handbook of Thermal Spray Technology* [online]. USA: ASM International, 2004 [cit. 2013-03-16]. ISBN 978-0-87170-795-6. Dostupné z: [www.asminternational.org](http://www.asminternational.org)
- [2] PAWŁOWSKI, Lech. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, xxx, 626 p. ISBN 978-047-1490-494.
- [3] *WR Stainless Steel: HVOF povlaky* [online]. wrstainlesssteel.cz, 2010 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.wrstainlesssteel.cz/?page=14-plazmaticke-nastriky>
- [4] ING. ZAHÁLKA, František a Ing. Radek ENŽL, PH.D. Žárově stříkané povlaky - moderní technologie tvorby povrchových ochranných vrstev. *MM Průmyslové spektrum*. 2005. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zarove-strikane-povlaky-moderni-technologie-tvorby-povrchovych-ochra.html>
- [5] PAWŁOWSKI, Lech. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, xxx, 626 p. ISBN 978-047-1490-494.
- [6] ING. ŠIMŮNKOVÁ HOUDKOVÁ, Šárka, Ing. Radek ENŽL, PH.D. a Ing. Olga BLAHÁKOVÁ, PH.D. *Žárové nástřiky: Metody žárových nástřiků* [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8.html>
- [7] SULZER. *An Introduction to Thermal Spray*. 2012. Dostupné z: [http://www.sulzer.com/en/-/media/Documents/ProductsAndServices/Coating\\_Equipment/Thermal\\_Spray/Brochures/Thermal\\_Spray\\_V4.pdf](http://www.sulzer.com/en/-/media/Documents/ProductsAndServices/Coating_Equipment/Thermal_Spray/Brochures/Thermal_Spray_V4.pdf)
- [8] *FLAME SPRAY TECHNOLOGIES: High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)* [online]. Netherlands, 2007 [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: <http://www.fst.nl/hvof-high-velocity-oxygen-fuel/>
- [9] DAVIS, Joseph R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. USA: ASM International, 2004. ISBN 978-0-87170-795-6.

- [10] PAWŁOWSKI, Lech. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, xxx, 626 p. ISBN 978-047-1490-494.
- [11] *Kennametal Stellite: Super Stelcar* [online]. USA, [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://stellite.com/ProductsServices/HardfacingAlloys/Powder/CompositeAlloysandCarbides/SuperStelcar50/tabid/145/Default.aspx>
- [12] *Kennametal Stellite: Stellite 190* [online]. USA, [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: [http://stellite.com/Portals/0/KMT\\_Stellite190\\_DataSheet\\_FINAL.pdf](http://stellite.com/Portals/0/KMT_Stellite190_DataSheet_FINAL.pdf)
- [13] *Kennametal Stellite: Stellite 21* [online]. USA, [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: [http://stellite.com/Portals/0/KMT\\_Stellite21\\_DataSheet\\_FINAL.pdf](http://stellite.com/Portals/0/KMT_Stellite21_DataSheet_FINAL.pdf)
- [14] PAWŁOWSKI, Lech. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, xxx, 626 p. ISBN 978-047-1490-494.
- [15] *Praxair Surface Technologies: Model JP-5000® HP/HVOF® System* [online]. USA: Praxair S.T. Technology Inc., 2006, 31.7. 2006 [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://www.praxairsurfacetechologies.com/na/us/pst/pst.nsf/AllContent/BF6288EF9774415B85257706006DA346?OpenDocument&URLMenuBranch=42B8055E783DAFAE85257706006DE1FB>
- [16] *Astro Alloys Inc: Thermal spray equipment and supplies* [online]. USA: Astro Alloys Inc., 2009 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: [http://www.astroalloys.com/praxair\\_5000\\_hv.php](http://www.astroalloys.com/praxair_5000_hv.php)
- [17] *Praxair Surface Technologies: JP-8000™ HP/HVOF® System* [online]. USA: Praxair S.T. Technology Inc., 2006, 31.7. 2006 [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://www.praxairsurfacetechologies.com/na/us/pst/pst.nsf/0/521781EB4784198B852576A50058D63B?OpenDocument>
- [18] *Praxair Surface Technologies: JP-8000™ HP/HVOF® System* [online]. USA: Praxair S.T. Technology Inc., 2006, 31.7. 2006 [cit. 2012-12-30]. Dostupné z:

<http://www.praxairsurfacetechologies.com/na/us/pst/pst.nsf/0/521781EB4784198B852576A50058D63B?OpenDocument>

- [19] *Kennametal Stellite: HVOF Equipment* [online]. USA: HVOF Equipment, 2008 [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://www.stellite.com/ProductsServices/Equipment/HVOFEquipment/tabid/343/Default.aspx>
- [20] *Astro Alloys Inc: Thermal spray equipment and supplies* [online]. USA: Astro Alloys Inc., 2009 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.astroalloys.com/stellite.php>
- [21] *Astro Alloys Inc: Thermal spray equipment and supplies* [online]. USA: Astro Alloys Inc., 2009 [cit. 2012-12-26]. Dostupné z: <http://www.astroalloys.com/stellite.php>
- [22] *Kennametal Stellite: HVOF Equipment* [online]. USA: HVOF Equipment, 2008 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.stellite.com/ProductsServices/Equipment/HVOFEquipment/tabid/343/Default.aspx>
- [23] *Sulzer: igh Velocity Oxygen (Gas) Fuel Spray* [online]. Switzerland: Sulzer Ltd, 2002 [cit. 2013-02-07]. Dostupné z: <http://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/Coating-Equipment/Thermal-Spray/Processes/HVOF-Liquid-Fuel>
- [24], [25] *Sulzer: igh Velocity Oxygen (Gas) Fuel Spray* [online]. Switzerland: Sulzer Ltd, 2002 [cit. 2013-02-07]. Dostupné z: <http://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/Coating-Equipment/Thermal-Spray/Processes/HVOF-Gas-Fuel>
- [26] DAVIS, Joseph R. ASM INTERNATIONAL. *Handbook of Thermal Spray Technology* [online]. USA: ASM International, 2004 [cit. 2013-03-16]. ISBN 978-0-87170-795-6. Dostupné z: [www.asminternational.org](http://www.asminternational.org)

- [27] ING. ŠIMŮNKOVÁ HOUDKOVÁ, Šárka, Ing. Radek ENŽL, PH.D. a Ing. Olga BLAHÁKOVÁ, PH.D. *Žárové nástřiky: Vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF* [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: [http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8\\_3.html](http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8_3.html)
- [28] *Kennametal Stellite: HVOF & Thermal Spray Powders* [online]. USA: *HVOF & Thermal Spray Powders*, 2008 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.stellite.co.uk/ProductsServices/HVOFThermalSprayPowders/tabid/68/Default.aspx>
- [29] PAWŁOWSKI, Lech. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, xxx, 626 p. ISBN 978-047-1490-494.
- [30], [31] *Wuxi City Xinke Surface Engineering Material Co: WC-12% Co-4% Cr série stříkání práškových slitin* [online]. Čína, 1999 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: [http://wxxinke.en.alibaba.com/product/577682921-213709477/WC\\_12\\_Co\\_4\\_Cr\\_series\\_spraying\\_alloy\\_powder.html](http://wxxinke.en.alibaba.com/product/577682921-213709477/WC_12_Co_4_Cr_series_spraying_alloy_powder.html)
- [32], [33], [34], [35] DELORO STELLITE, Inc. *Stellite Thermal Spray powder Tribaloy T-400: Tribaloy® T-400 Intermetallic Powder*. 2001, 5 s. Dostupné z: <http://www.astroalloys.com/pdfs/Stellite%20Thermal%20Spray%20powder%20%20Tribaloy%20T-400.pdf>
- [36], [37], [38], [39] DELORO STELLITE, Inc. *Stellite Thermal Spray powder Tribaloy T-800: Tribaloy® T-800 Intermetallic Powder*. 1993, 5 s. Dostupné z: <http://www.astroalloys.com/pdfs/Stellite%20Thermal%20Spray%20powder%20%20Tribaloy%20T-800%20-%20JK558H.pdf>
- [40] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-718-3262-6.
- [41] *INOX, spol. s r. o.: NEREZOVÁ OCEL 1.4301* [online]. 2009 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>



- [42], [43] Norma ČSN 41 7240. *Ocel 17 240 Cr-Ni*. Praha: Český normalizační institut, 1973.
- [44] PAWŁOWSKI, Lech. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, xxx, 626 p. ISBN 978-047-1490-494.
- [45] *Technical bulletin: Amperit 529* [online]. H.C. Starck, 2011 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.hcstarck.com/hcs-admin/file/ae23e4b2316f58850131d77c8c341ac7.de.0/Amperit%20529%20Material%20Bulletin.pdf>
- [46] *Praxair Surface Technologies: Powder Solutions Catalog* [online]. USA: 9 Praxair Technology, Inc., 2009 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: [http://www.praxairsurfacetechologies.com/na/us/pst/pst.nsf/0/085C6CF7641FE446852576A50058300A/\\$file/Powder+Brochure.pdf](http://www.praxairsurfacetechologies.com/na/us/pst/pst.nsf/0/085C6CF7641FE446852576A50058300A/$file/Powder+Brochure.pdf)
- [47], [48] *Certificate of Analysis and Certificate of Conformity: Co-109*. USA: Praxair Surface Technologies, 2012.
- [49] *Model JP-5000 High Pressure/HVOF*. USA: Praxair Surface Technologies Company.
- [50] *Technical Data Bulletin: MODEL JP-5000 HP/HVOF SYSTEM*. USA: Praxair Surface Technologies Company.
- [51] *Laser Zentrum Nord: Maschinen-Infrastruktur LZN* [online]. Hamburk, 2012 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.lzn-hamburg.de/ueber-uns/infrastruktur.html>
- [52] *JOY Science & Trading: ProntoPress-20* [online]. JOY&T, 2005 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: [http://www.joyst.co.kr/new/sub02/sub02\\_7.htm?type=read&id=787&page=1&cat1\\_name=&cat2\\_name=STRUERS&cat3\\_name=MOUNTING](http://www.joyst.co.kr/new/sub02/sub02_7.htm?type=read&id=787&page=1&cat1_name=&cat2_name=STRUERS&cat3_name=MOUNTING)

- [53] *Instrument.com.cn* [online]. 1999 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.instrument.com.cn/netshow/C137184.htm>
- [54] *VŠCHT: Metalografie I. - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem* [online]. Praha, 2009, 18.4.2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_metalografie\\_1/teorie.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm)
- [55] PÍŠEK, František, Karel CÍHA, Martin ČERNOHORSKÝ a Dalibor RŮŽIČKA. *Nauka o materiálu II. 2. svazek*. 1. vyd. Praha: ČSAV, 1959, 669 s.
- [56] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 133 s. ISBN 978-80-248-0870-3.